

Abstract (Basic): JP 2000314817 A ✓

NOVELTY - A thin film is formed on a substrate by a thin film formation unit. A marking mechanism (13) presses predetermined fine structure on the thin film to perform fine structure marking. The substrate is conveyed between thin film formation unit and marking mechanism. A control unit controls thin film formation unit, marking mechanism and the conveyance of substrate.

USE - For manufacture of three-dimensional photonic crystal for use as optical elements such as optical waveguide, resonator.

ADVANTAGE - Enables manufacturing high quality three-dimensional photonic crystal within short time.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows schematic components of three-dimensional photonic crystal manufacturing apparatus.

Marking mechanism (13)

pp; 18 DwgNo 1/26

Title Terms: THREE; DIMENSION; PHOTON; CRYSTAL; MANUFACTURE; APPARATUS;

OPTICAL; ELEMENT; OPTICAL; WAVEGUIDE; CONTROL; UNIT; CONTROL; THIN; FILM;

FORMATION; FINE; STRUCTURE; MARK; SUBSTRATE; CONVEY

Derwent Class: P81; V07

International Patent Class (Main): G02B-006/13

File Segment: EPI; EngPI

Manual Codes (EPI/S-X): V07-F01A5

AL3

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-314817

(P2000-314817A)

(43) 公開日 平成12年11月14日 (2000. 11. 14)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 2 B 6/13

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

テマコード* (参考)

M 2 H 0 4 7

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号

特願平11-123413

(22) 出願日

平成11年4月30日 (1999. 4. 30)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 石井 哲好

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(72) 発明者 鈴木 雅則

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本

電信電話株式会社内

(74) 代理人 100083552

弁理士 秋田 収喜

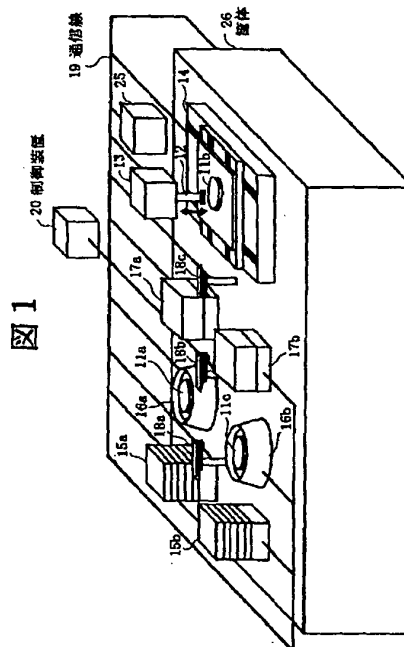
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元フォトニック結晶の作製装置

(57) 【要約】

【課題】 不均一部分を導入する。高品質の3次元フォトニック結晶を作製する。作製時間を短縮する。高品質で生産性の高い3次元フォトニック結晶の作製装置を提供する。

【解決手段】 基板上に複数の薄膜が積層されて構成される積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製装置であって、前記基板に薄膜を形成する薄膜形成手段と、微細構造の型を前記薄膜に押し当て微細構造刻印する微細構造刻印手段と、前記薄膜形成手段と微細構造刻印手段との間で、前記基板を搬送する手段と、前記各手段を制御する制御手段とを具備する装置である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に複数の薄膜が積層されて構成される積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製装置であって、

前記基板に薄膜を形成する薄膜形成手段と、
微細構造の型を前記薄膜に押し当て微細構造刻印する微細構造刻印手段と、

前記薄膜形成手段と微細構造刻印手段との間で、前記基板を搬送する手段と、

前記各手段を制御する制御手段とを具備することを特徴とする3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項2】 基板上に複数の薄膜が積層されて構成される積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製装置であって、

前記薄膜形成手段は、前記基板を回転させる手段、前記基板に前記薄膜の材料を含む液体を滴下する手段、前記液体が滴下された前記基板を加熱する手段、及び前記回転手段と加熱手段との間を前記基板を搬送する手段で構成されることを特徴とする請求項1に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項3】 基板上に複数の薄膜が積層されて構成される積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製装置であって、

微細構造刻印手段は、所定の微細構造を有する型を保管する手段、前記型を洗浄する手段、前記型を保持する手段、前記保管手段、洗浄手段、保持手段の相互の間を前記型を搬送する手段、前記保持手段毎に前記型を前記基板に位置合わせする手段、及び前記保持手段ごとに前記型を前記薄膜に押し当てて構成されることを特徴とする請求項1又は2に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項4】 前記型を前記基板に位置合わせする手段は、前記型に組み込まれた微細構造位置合わせマークを設け、前記マークが刻印された前記薄膜との位置ずれを、前記微細構造位置合わせマークに対してレーザー光を用いたヘテロダイン方式で検出することを特徴とする請求項2又は3に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項5】 前記型を前記基板に位置合わせする手段は、前記型に組み込まれた微細構造位置合わせマークを設け、前記マークが刻印された前記薄膜との位置ずれを、前記微細構造位置合わせマークに対してレーザー光を用いたヘテロダイン方式で検出することを特徴とする請求項2又は3に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項6】 前記型を前記薄膜に押し当てる手段は、素子を配置し、電気信号により位置情報を検出すること

を特徴とする請求項3ないし請求項5のうちいずれか1項に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【請求項7】 前記型を前記薄膜に押し当てる手段は、前記薄膜のスパークと前記型の所定の位置に対するレーザー光の干渉光から位置情報を検出することを特徴とする請求項3ないし請求項5のうちいずれか1項に記載の3次元フォトニック結晶の作製装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、3次元フォトニック結晶の作製方法及び装置に関し、特に、光導波路や共振器等の光素子として適用可能な3次元フォトニック結晶を作製する装置に関する。

【0002】

【従来の技術】フォトニック結晶は、屈折率が異なる物質が周期的に配設された周期構造物であり、物質間の屈折率が大きく異なる多重反射に基づいてフォトニックバンドギャップと呼ばれる光の伝搬を禁止する周波数帯が現れる。したがって、周期構造中に周期を乱す不均一部分を導入すれば、その部分に光が閉じ込められるので光を導波路や共振器として、フォトニック結晶を適用することが可能となる。そのため、3次元の周期構造を有するフォトニック結晶（以下、3次元フォトニック結晶ともいう）に不均一部分を導入することで、より一層高い光の閉じ込め効果が達成されることから、超微小立体光回路や超低しきい値レーザー等の高性能な光デバイスの実現が期待される。

【0003】従来、3次元フォトニック結晶の作製方法としては、以下に示すものが報告されている。

(1) フライエッチングを利用した方法 (C.C.Cheng et al., J. Vac. Sci. Technol., B, vol. 13, no. 6, pp. 2696-2700, 1995 参照)

本方法では、シリウム酸素のような屈折率の高い基板にフライエッチングで穴をあける。その際、基板の面に対して垂直な軸から約35度の傾きで120度ずつ3方向から穴をあける。この方法では、ダイヤモンド構造に近い周期構造が得られ、全方向に対してフォトニックバンドギャップが形成されることが理論的に示されている。【0004】(2) X線リソグラフィを利用した方法 (G.Feiertag, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 71, no. 11, pp. 1441-1443 参照)

本方法では、X線リソグラフィを適用し、(1)の方法と同様に、ダイヤモンド構造を得る方法である。X線を硬化型感光性樹脂に(1)の方法と同様な方向から照射して硬化させ、現像によって(1)の方法の穴に相当する部分を残してフォトニック結晶を作製するものである。

(3) 微小球の自己配列を利用した方法 (H.Miguel, et al., Appl. Phys. Lett., vol. 71, no. 9, pp. 1148-1150, 1997 参照)

本方法は、球径のそろった二酸化シリコンの微粒子をコロイド状分散液から3次元方向に規則正しく成長・配列

させフォトニック結晶を形成するものである。

【0005】(4) ボンディングを利用した方法 (S.No da et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 35, pp. L909-912, 1996 参照)

本方法は、基板上に形成した高屈折率薄膜に対してリソグラフィとドライエッチングとにより2次元周期構造を作製した後、基板同士の反転融着(周期構造同士の融着)・基板不要部除去を繰り返し、2次元周期構造を積層して3次元フォトニック結晶を形成するものである。

【0006】(5) 一層ごとの微細加工を利用した方法 (K.A. McIntosh et al., Appl. Phys. Lett., vol. 70, no. 2, pp. 2937-2939 参照)

本方法は、一層ごとに薄膜形成、リソグラフィ、ドライエッチングを行い2次元周期構造を作製し、それを繰り返すことにより3次的に積層してフォトニック結晶を形成するものである。

(6) 多層膜バイアススパッタ法を利用した方法 (川上他, 信学論, C-1, vol. J80-C-1, no. 6, pp. 296-299, 1997 参照)

本方法は、基板上にあらかじめ微細構造を形成し、シリコンと酸化シリコンとをその基板上に交互に積層していくもので、バイアススパッタ法を適用することにより、基板上の微細構造を反映した3次元フォトニック結晶が形成される。前記(3)から(6)の方法は、屈折率の大きい微小体積要素を屈折率の小さい媒質中に面心立方構造状に配置して結晶を得るもので、フォトニックバンド効果が発現することが理論的、かつ実験的に示されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかし、前記従来の作製方法については、以下のような解決すべき課題があった。まず、前記(1)～(3)の方法については、フォトニック結晶の作製は可能であるが、該結晶中に周期構造を乱す不均一部分を導入することは技術的に困難で、実用的なデバイス作製には適していない。次に、前記

(4)の方法は、2次元周期構造作製時に周期の不均一部分の導入が可能で、デバイス作製上の点から有望とみられるが、2次元周期構造を積層する際に一層ごとにリソグラフィ、ドライエッチング、ウエハ融着のプロセスが必要で、作製プロセスが煩雑で、かつ時間がかかるため、多量の基板を処理する上で実用上問題があった。また、前記(5)の方法についても、前記(4)の方法と同様に3次元周期構造中に不均一部分を導入することが可能であるが、一層ごとに薄膜形成、リソグラフィ、ドライエッチングの3プロセスが必要となり作製時間に問題があった。さらに、前記(6)の方法は、作製プロセスが単純で、材料もシリコンと酸化シリコンとの組み合わせということから、現在最も有望視されているものであるが、周期構造中への不純物の導入において、積層方向(基板に垂直な方向)には容易であるが、水平方向

(基板に水平な方向)には、それほど容易ではないという問題があった。

【0008】本発明は、前記従来技術の問題点を解決するためになされたものであり、本発明の目的は、不均一部分を導入することが容易な技術を提供することにある。本発明の他の目的は、高品質の3次元フォトニック結晶を作製することが可能な技術を提供することにある。本発明の他の目的は、作製時間を短縮することが可能な技術を提供することにある。本発明の他の目的は、高品質でかつ生産性の高い3次元フォトニック結晶の作製装置を提供することにある。本発明の前記ならびにその他の目的と新規な特徴は、本明細書の記述及び添付図面によって明らかにする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本願において開示される発明のうち、代表的なものの概要を簡単に説明すれば、下記の通りである。

(1) 基板上に複数の薄膜が積層されて構成される積層体構造を有する3次元フォトニック結晶の作製装置であって、前記基板に薄膜を形成する薄膜形成手段と、微細構造の型を前記薄膜に押し当て微細構造刻印する微細構造刻印手段と、前記薄膜形成手段と微細構造刻印手段との間で、前記基板を搬送する手段と、前記各手段を制御する制御手段とを具備する装置である。

(2) 前記手段(1)の3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記薄膜形成手段は、前記基板を回転させる手段、前記基板に前記薄膜の材料を含む液体を滴下する手段、前記液体が滴下された前記基板を加熱する手段、及び前記回転手段と加熱手段との間を前記基板を搬送する手段で構成される装置である。

(3) 前記手段(1)又は(2)の3次元フォトニック結晶の作製装置において、微細構造刻印手段は、所定の微細構造を有する複数の型を保管する手段、前記型を洗浄する手段、前記型を保持する手段、前記保管手段、洗浄手段、保持手段の相互の間を前記型を搬送する手段、前記保持手段ごとに前記型を前記基板に位置合わせする手段及び前記保持手段ごとに前記型を前記薄膜に押し当てる手段で構成される装置である。

(4) 前記手段(2)又は(3)の3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記型を前記基板に位置合わせする手段は、前記型に組み込まれた微細構造位置合わせマークを設け、前記マークが刻印された前記薄膜との位置ずれを、前記微細構造位置合わせマークに対してレーザ光を用いたヘテロダイン方式で検出する装置である。

【0010】(5) 前記手段(2)又は(3)の3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記型を前記基板に位置合わせする手段は、前記型に組み込まれた微細構造位置合わせマークを設け、前記マークが刻印された前記薄膜との位置ずれを、前記微細構造位置合わせマー

クに対してレーザ光からの回折光から位置情報を検出する装置である。

(6) 前記手段(3)ないし(5)のうちいずれか1つの3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記型を前記薄膜に押し当てる手段は、前記薄膜のステージあるいは前記型の所定の位置に圧電素子を配置し、電気信号により位置情報を検出する装置である。

(7) 前記手段(3)ないし(5)のうちいずれか1つの3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記型を前記薄膜に押し当てる手段は、前記薄膜のステージと前記型の所定の位置に対するレーザ光の干渉光から位置情報を検出する装置である。

【0011】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、実施の形態を説明するための全図において、同一機能を有するものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。

(実施の形態1) 図1は、本発明による実施形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置の概略構成を示す図であり、図2は本実施形態1の薄膜の形成された基板と微細構造を有する型との位置合せ機構の概略構成を示す図である。本実施形態1のフォトニック結晶の作製装置は、図1及び図2に示すように、複数の基板11a、11b、11c、微細構造を有する型12、刻印機構部13、刻印用基板ステージ14、複数の基板保管部15a、15b、複数の回転塗布機構部16a、16b、複数の熱処理機構部17a、17b、複数の搬送用ロボット18a、18b、18c、通信線19、制御装置20、複数のミラー22a、22b、光検出器23a、23b、位置合わせ用微細構造マーク24a、24b、型保管庫25、及び筐体26からなっている。

【0012】前記刻印機構部13は、図2に示すように、レーザ光21a、21bを照射するレーザ光源(図示せず)と、ミラー22a、22bと、光検出器(23a、23b)等からなる光学系が配備されている。そして、基板11と型12との両方に予め形成したグレーティング状のマーク24a、24bに対して、波長のわずかに異なるレーザ光21a、21bを左右対称の方向から入射させ、前記マーク24a、24bからの回折光の光ヘテロダイン干渉光を光検出器(23a、23b)によりビート信号として検出する。光検出器(23a、23b)で検出されたビート信号の位相から、前記基板11及び型12の相対的な位置を検出し、その検出値を、刻印用基板ステージ14あるいは型12の駆動機構にフィードバックし、所定の位置範囲に基板11と型12とを位置合わせする。また、前記基板11及び型12の位置情報を検出する方法として、光ヘテロダイン干渉方式以外に、マークからの回折光の強度変化によりマークの位置情報を検出する方法を用いても同様の効果が得られる。さらに、位置合わせ用のマークとして、回折格子の

他にフレネルゾーンプレートを用いた集光光学系によるレーザ光のビームスポット位置を検出してマーク位置情報とする方式を用いても同様の効果が得られる。

【0013】また、刻印深さは、刻印用基板ステージ14の上方に、レーザ光源と検出器を配置し、干渉光により刻印用基板ステージ14のステージ面と型12の型面間との距離、ならびに、刻印用基板ステージ14のステージ面と基板11の表面との間の距離を常時検出することにより、型12を所定の位置に制御可能である。また、刻印用基板ステージ14のステージ、あるいは、型12に圧電素子を設け、この圧電素子で検出された圧力により、型12を所定の位置に制御することも可能である。

【0014】次に、第1の屈折率を有する材料として、酸化チタン複合材料(屈折率約2.6)を前記基板11上に所定量滴下し、回転塗布する。

(a) 次に、搬送用ロボット18bを用いて、酸化チタン複合材料が回転塗布された基板11を、熱処理機構部17aに搬送し、プリベーク処理を行うことにより、基板11上に前記酸化チタン複合材料の薄膜を形成する。次に、搬送用ロボット18cを用いて、基板11を刻印用基板ステージ14に搬送し、刻印機構部13において、予め型保管庫25から移動して刻印機構部13に装着された、所定の微細構造を有する型12を、酸化チタン複合材料から成る薄膜に押し当てて刻印し、2次元の微細周期構造を形成する。次に、搬送用ロボット18cを用いて、基板11を熱処理機構部17bに搬送し、ポストベーク処理を行うことにより、酸化チタン複合材料から成る周期構造薄膜を固化する。

(b) 次に、搬送用ロボット18bを用いて、工程(a)で形成された薄膜(酸化チタン複合材料から成る薄膜)を有する基板11を回転塗布機構部16bに搬送する。次に、前記薄膜上に第2の屈折率を有する材料として、酸化ケイ素複合材料(屈折率約1.4)を所定量滴下し、回転塗布する。次に、搬送用ロボット18bを用いて、酸化ケイ素複合材料が回転塗布された基板11を、熱処理機構部17aに搬送し、プリベーク処理を行うことにより、基板11上に前記酸化ケイ素複合材料の薄膜を形成する。次に、搬送用ロボット18cを用いて、基板11を刻印用基板ステージ14に搬送し、刻印機構部13において、工程(a)で使用したものと同一型12か、あるいは別の微細構造を有する型12を、酸化ケイ素複合材料から成る薄膜に押し当てて刻印し、2次元の微細周期構造を形成する。次に、搬送用ロボット18cを用いて、基板11を熱処理機構部17bに搬送し、ポストベーク処理を行うことにより、酸化ケイ素複合材料から成る周期構造薄膜を固化する。なお、酸化チタン複合材料と酸化ケイ素複合材料の熱処理温度は、工程処理上同じであることが好ましいが、異なってもかまわない。また、必要に応じて熱処理機構を増設する

ことも可能である。前記工程(a)、(b)を繰り返すことにより、屈折率の異なる2つの材料からなる3次元の微細周期構造が得られる。また、3次元周期構造中への不均一部分の導入は型を替えることにより柔軟にかつ容易に行うことができる。

【0015】本実施形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置では、刻印工程を複数回行う必要があり、薄膜層間の重ね合わせ精度が重要となる。良好な3次元フォトニック結晶を得るためには、重ね合わせ精度は少なくとも $0.05\mu\text{m}$ 以下が必要とされる。そのために、本実施形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置では、薄膜層間の重ね合わせを、基板11及び型12に微細構造位置合わせ用マークを配置し、レーザ光を用いたヘテロダイン方式により、基板11と型12との位置情報を検出し、重ね合わせを実行している。さらに、本実施の形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置において、前記した一連の工程は、制御装置(CPU)20に予め格納されている工程プログラムに基づき、制御装置20が、通信信号線19を介して各部を制御して、自動的に実行される。図3、図4は、本実施形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置における、各工程の流れの一例を示す図である。図3に示す例は、本実施形態1の3次元フォトニック結晶の作製装置では、第1の屈折率を有する材料、あるいは第2の屈折率を有する材料の薄膜を基板11上に形成する際に、回転塗布、プリベーク、刻印、ポストベークの各処理工程を次々に処理しパイプライン処理を可能とするものである。

【0016】この場合、適当なバッファ(一時待機)機構を設け処理待ち時間の調整を行うことができる。

【0017】また、図4は、型12を交換する場合の処理工程の流れの一例を示すものである。この場合にも、適当にバッファ機構を設けることにより、パイプライン処理が可能となる。この図4に示す例では、型交換に時間を要するため、図4に示すようにプリベーク後にバッファを設けることが適当である。図5は、本実施の形態の3次元フォトニック結晶の作製装置を使用して形成された3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【0018】以上説明したように、本実施形態1によれば、薄膜形成機構、熱処理機構、刻印機構が一体化され、作製工程が自動化されているので、従来の方法に比べてフォトニック結晶の生産性が飛躍的に向上する。また、薄膜と型との高精度な位置合わせ機構及び刻印探索制御機構を有しているため、高品質のフォトニック結晶を作製することができ、かつデバイス作製に必要な結晶中への不均一部分の導入も容易に行うことができる。その結果、超微小光回路や超低しきい値レーザー等の高性能な光デバイスを実現することができる。

【0019】(実施形態2)図6は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態2の3次元フォ

トニック結晶の作製方法を説明するための図で、図6の(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式断面図である。また、図7はそのような作製方法で使用される型の斜視図である。図6(a)において、型4は2次元方向に沿って周期的に凹凸構造(以下、2次元周期構造ともいう)が形成された一面(該面に垂直な方向から見て格子状に形成された凹凸構造)を有する。即ち、型4の一面上に矩形状の複数の凸部が格子状に配列している。まず始めに、図6(a)に示すように基板1上に第1の屈折率(n_1)を有する第1の材料からなる薄膜2を積層する。その後、型4(図7参照)を、前記薄膜2の上面に押し当てることで、該薄膜2の表面に前記凹凸構造(以下、2次元周期構造ともいう)を刻印する(図1(b))。この2次元周期構造が形成された薄膜2上に、さらに第2の屈折率(n_2)を有する第2の材料からなる薄膜3を積層する(図6(c))。その後、薄膜2の場合と同様に型4による刻印を行うことで、2次元周期構造を薄膜3の表面に形成する(図6(d))。

【0020】この際、薄膜2で適用した2次元周期構造とは異なる2次元周期構造を適用することも可能である。このように、屈折率の異なる薄膜2および薄膜3をそれぞれ2次元周期構造を形成しながら交互に積層して積層体を形成する。

【0021】図8は、2次元周期構造を有する薄膜2及び薄膜3が基板上に積層された積層体からなる3次元フォトニック結晶の斜視図である。この図8では、2次元周期構造を有する薄膜2及び薄膜3が基板上に5回にわたって交互に積層されることで3次元の微細周期構造を持つ積層体となっている。

【0022】以下の説明では、1つの薄膜2と1つの薄膜3とを積層することを積層体形成の一周期とする。したがって、例えば、第3周期目の積層という場合、すでに2つの薄膜2と2つの薄膜3とが交互に積層して形成された積層体の上に、さらに1つの薄膜2と1つの薄膜3とを積層することをいう。

【0023】次に、このような積層体の周期構造中に、周期を乱す不均一部分を導入する方法について説明する。不均一部分を導入するために、前記積層体を形成する際に、例えば前記2次元周期構造の一部に不均一部分が設けられた型を使用する。そのような不均一部分が設けられた型の一例を図9に示す。

【0024】この図9では、複数の凸部がなす格子模様の中心に位置する一つの凸部が欠けることで、2次元周期構造の一部に不均一部分が設けられた型5となる。即ち、型5は上方向から見て十字形の凹部が不均一部分として存在する型となる。このような型5によって刻印された積層体の一例を図10に示す。なお、不均一部分の形状は特定の形に限定されるものでなく、十字形のみならず、円形、矩形、L字形、X形等、実際のデバイス作製に応じて任意の形状が可能である。例えば、L

字状に複数の凸部を取り除くことで不均一な部分が形成された型6を図11に示す。

【0025】図12は、前記図8の積層体を形成する際に、第5周期目の2次元周期構造をそれぞれ型6を用いて作製した例を示す。図12に示すように、積層体の最上層として位置する第2の屈折率を有する薄膜3に不均一な2次元周期構造が形成されている。また、第5周期目のみならず、不均一な部分を有する型を連続して用いることで、垂直方向に不均一な部分が連続して形成された積層体を設けることも可能である。また、図10又は図12の積層体の最上層に、さらに6周期、7周期と2次元の均一な周期構造4あるいは不均一な周期構造5又は6を積層させることも可能である。

【0026】前述の薄膜形成には、スパッタ法、真空蒸着法、化学的気相成長法等の適用が可能である。そのなかでも、プロセスの簡略化という観点から、ゾルーゲル法を用いた回転塗布法が最も好ましい。ゾルーゲル法は、例えば、作花済夫著『ゾルーゲル法の応用』（アグネ承風社刊、1997年）に記述されているように、あらかじめ調整された薄膜原料の溶液あるいは分散液に熱や光を当てて化学反応を引き起こして固化させるものである。この方法では出発材料が液体であるため、回転塗布によって均一な薄膜が得られることや比較的低温でガラス、セラミックス等をはじめとして種々な複合材料の薄膜を容易に得ることができる等の利点がある。また、成分・作製プロセスを適当に制御することによって、柔らかいゲル膜が得られるため、室温で刻印法による微細パターン形成が可能となる。このゾルーゲル法回転塗布膜を用いた刻印法による直接パターン形成では、すでにサブミクロンパターンの溝を持つコンパクトディスクが作製されており、本発明の目的とする周期構造パターンの解像性は技術的に十分可能な範囲にある。

【0027】一方、刻印には現在コンパクトディスク製造に使用されているような、いわゆるスタンパーと称される装置の利用が可能である。コンパクトディスク製造では、通常一回の刻印で工程が終了するが、本発明にもとづく3次元フォトニック結晶の作製に適用する場合、刻印工程を繰り返して行う必要があるので層間の重ね合わせ精度が重要となる。良好なフォトニック結晶を得るためには、重ね合わせ精度は少なくとも $0.05\mu\text{m}$ 以下であることが必要とされる。これには、半導体製造用のリソグラフィ技術、特にX線リソグラフィ技術で用いられた何らかの位置合わせ技術の適用が有望である。X線リソグラフィは、マスクとウエハとを数 $10\mu\text{m}$ に近づけ、マスクパターン寸法をウエハに1対1の比率で転写する等倍露光法が主流であり、型を用いた刻印法等も倍パターン形成であるため、技術的互換性が高い。現在のXステップの重ね合わせ精度は、 $0.02\mu\text{m}$ 程度であるので、この技術を転用すれば精度 $0.05\mu\text{m}$ 以下で3次元周期構造を積層することが可能である。

【0028】また、型については、現在半導体リソグラフィで行われているフォトマスク、X線マスク作製と同様に、電子線リソグラフィ技術とドライエッチング技術とを用いて作製することが可能である。型用の基板としては、硬く高耐性のものが好ましく、炭化ケイ素、石英、シリコン、二酸化シリコン（熱酸化法、スパッタ法、化学的気相法による）、人造ダイヤモンド、ステンレス、ニッケル、セラミック等からなる基板があげられる。

【0029】（実施形態3）図13は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態3の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図13の（a）及び（b）は各工程を説明するための模式断面図である。本実施形態3は、複数の薄膜に対して一回の刻印で3次元周期構造を形成することと特徴とする。したがって、薄膜形成法、刻印に用いる型等については前記実施形態2と同様なものとするのが可能であるのみならず、フォトニック結晶の作製過程を大幅に簡略化することが可能である。

【0030】以下、本実施形態3の3次元フォトニック結晶の作製方法について説明する。はじめに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。次に、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。さらに、薄膜2及び薄膜3を交互に積層して、最終的にそれぞれの薄膜が3層形成された交互積層膜が形成される。

【0031】このように形成された交互積層膜に対して、図13（a）に示すようにして、前記実施形態2と同様に、図7に示す型を該交互積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。その結果、図13（b）に示すように、薄膜2及び薄膜3からなる積層体に3次元周期構造が形成される。3次元周期構造への不均一部分の導入は、前記実施形態2と同様に、型を替えることによって容易に行うことができる。

【0032】基板と平行に不均一部分を導入する一例を以下説明する。なお、前記実施の形態2と同様に、本実施の形態においても任意の形状を有する型を用いることが可能である。まず、3周期積層後の刻印を、図7の均一微細周期構造を有する型4で行う。次に、4周期目の第1あるいは第2の屈折率を有する材料の薄膜に対して、例えば、図9の型5又は図11の型6を用いて刻印を行う。その後、再び交互に膜を積層し、図7の型4で刻印することで、任意の層中に不均一部分を形成することができる。また、基板と垂直な方向に不均一部分を導入する場合は、3周期積層後の刻印を、例えば、図9の型5又は図11の型6で行う。

【0033】このように、本実施の形態において、3次元周期構造への不均一部分導入は、最小3回の刻印工程を行うことで実現できる。その結果、3次元フォトニック結晶の作製過程を大幅に簡略化することが可能とな

り、また重ね合わせ精度も大幅に向上させることが可能となる。

【0034】(実施形態4) 図14は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態4の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図14の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式断面図である。以下、本実施形態例の3次元フォトニック結晶の作製方法について説明する。まず始めに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。次に、図7に示すものと同様の型4を、図14(a)に示すようにして積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する(図14(b))。

【0035】2次元周期構造が形成された薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。その後、図7に示す型と同様の微細周期構造を有するとともに、該微細周期構造の周囲に凸状の支柱部を形成する型4bを用いて刻印を行う(図14(c)～(d))。支柱部形成用の型の一例を図15に示す。この型4bは、微細周期構造形成に寄与する凹凸部と、該凹凸部を囲むようにして凹凸部と所定の距離間隔して立設する凸部とからなる。支柱部形成用の型によって形成される支柱パターン(すなわち、前記凸部によって刻印される薄膜部分)は、3次元構造の支柱を形成するためのものである。したがって、凸部によって刻印される薄膜部分はできるだけ薄くなることが望ましい。

【0036】次に、型4bによる刻印が施された薄膜3上に薄膜2を積層し、図7に示すものと同様の型4で刻印する(図14(e))。このようにして形成された積層構造体の中で、第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を除去して空隙とする。これにより、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2と空気とからなる3次元周期構造が形成される。この場合、特に周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型ならびに刻印を制御することが重要である。

【0037】図16は、5周期積層後の3次元積層体構造を示す斜視図である。3次元周期構造中への不均一部分の導入も、実施の形態2、3と同様の方法で行うことができる。図17及び図18は、不均一部分が導入された場合の例を示す斜視図である。

【0038】(実施形態5) 図19は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図19の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式断面図である。まず始めに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層し、図7に示すものと同様の型4で刻印する(図19(a)及び(b))。さらに、刻印された薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層して、型4で刻印する(図19(c))。

【0039】前記刻印によって2次元周期構造が形成さ

れた積層体上に、さらにレジスト9を塗布し、フォトマスク7を通して紫外線8を照射することで第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3の微細構造周辺部を除去する(図19(d))。続いて、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層し、型4で刻印する(図19(e))。このようにして形成された積層構造体の中で、第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を除去して空隙とする(図19(f))。これにより、第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2と空気とからなる3次元周期構造が形成される。この場合、特に、周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型ならびに刻印を制御することが重要である。また、支柱の間隔はフォトニック結晶の特性に影響を与えない距離とすることも重要である。

【0040】5周期積層後の3次元積層体構造は、前記実施の形態4と同様に、図16に示す構造となる。また、3次元周期構造中への不均一部分の導入も前記実施の形態2、3と同様の方法で行うことができ、この場合には、前記実施形態4と同様に、例えば、図17及び図18に示す構造となる。

【0041】(実施形態6) 図20は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図20の(a)ないし(d)は各工程を説明するための模式断面図である。まず始めに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。次に、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。さらに、薄膜2及び薄膜3を交互に積層して、最終的にそれぞれの薄膜が3層形成された交互積層膜を形成する。このように形成された交互積層膜に対して、図7に示す型4を図20(a)に示すようにして該交互積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。その結果、薄膜2及び薄膜3に3次元周期構造が形成される(図20(b))。

【0042】続いて、刻印がなされた積層構造体の最上部にフォトレジストを塗布し、フォトマスク7を通して紫外線8を照射することで第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3の微細構造周辺部を除去する。さらに、紫外線照射によってパターン形成された薄膜3をマスクとして、ドライエッチング等の手法を用いて交互積層構造をエッチングする。その後、エッチング部に第1の屈折率を有する材料2'を埋め込む(図20(c))。

【0043】以上の工程(図20(a)～(c))を繰り返すことで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。エッチング部の埋め込み材料としては第1の屈折率を有する材料が好ましいが、他の材料を用いることも可能である。最後に、前記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分除去して空隙とする(図20(d))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形

成される。この場合、特に、周期構造パターンの角の狭隙部においても十分な強度が保たれるように、型及び刻印を制御することが重要である。また、支柱の間隔はフォトニック結晶の特性に影響を与えない距離とすることも重要である。5周期積層後の3次元積層体構造は、前記実施の形態4、5と同様に、図16に示す構造となる。また、3次元周期構造中への不均一部分の導入も、前記実施の形態2、3と同様の方法で行うことができ、前記実施の形態4、5と同様に、例えば、図17及び図18に示す構造となる。

【0044】(実施形態7) 前記実施形態で使用された型4の形状を変えることで、種々の3次元周期構造を作製することが可能である。以下、その一例を図面を参照しながら説明する。図21は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態7の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図21の(a)ないし(f)は各工程を説明するための模式断面図である。また、図22は、この方法で適用される型の斜視図である。さらに、図23は、この方法によって作製される3次元積層体構造を示す斜視図である。まず始めに、基板1上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する。この薄膜2に対して、図22に示す型4を図21(a)に示すようにして該積層膜の上から押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。型4は、前記実施の形態2ないし6のものと、凹凸形状が異なるものを用いる。即ち、長方形の凸部が複数平行して設けられたものを用いる。次に、該薄膜2上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する(図21(b))。

【0045】続いて、薄膜2を積層し、型4を第1回目の刻印とは90度異なる方向に向けて再び刻印を行う(図21(c))。さらに、同様にして図21(d)及び(e)に示すように、積層と刻印とを繰り返すことで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。

【0046】最後に、前記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分(薄膜3)を除去して空隙とする(図21(f))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形成される(図23)。

【0047】(実施形態8) 図24は、本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態8の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図で、図24の(a)ないし(e)は各工程を説明するための模式断面図である。また、図25はこの方法で適用される型の斜視図である。さらに、図26はこの作製方法によって作製される3次元積層体構造を示す斜視図である。まず始めに、基板1上に第2の屈折率を有する材料からなる薄膜3を積層する。この薄膜3に対して、図25に示す型4を図24(a)に示すようにして該積層膜の上か

ら押し当てることによって2次元の微細周期構造を刻印する。型4は、前記実施の形態2ないし6のものと、凹凸形状が異なるものを用いる。即ち、正方形の凸部が複数等間隔に離間して設けられたものを用いる。次に、該薄膜2上に第1の屈折率を有する材料からなる薄膜2を積層する(図24(b))。

【0048】続いて、薄膜3を積層し、前記の型4による刻印を行う(図24(c))。さらに、同様にして図24(d)に示すように、薄膜2を積層することで、屈折率の異なる2種類の材料からなる交互積層構造が得られる。最後に、前記交互積層構造のうち、第2の屈折率を有する材料の部分(薄膜3)を除去して空隙とする(図24(e))。これによって、第1の屈折率を有する材料と空気とからなる3次元周期構造が形成される(図26)。

【0049】前記実施形態2ないし6のうちいずれか1つの方法にもとづいて3次元フォトニック結晶を具体的に作製した実施例を以下に示す。

(実施例1) 前記実施形態2にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(以下、PZTと呼ぶ。屈折率は約2.6)と、第2の屈折率を有する材料として酸化ケイ素複合材料(屈折率1.4)とを用い、3次元均一周期構造、及び不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0050】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布することで、該シリコン基板上に0.2 μ mの薄膜を形成した。次に、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、酸化ケイ素基板で作製した0.8 μ m周期構造(0.4 μ m角正方形パターン、パターン領域2mm)を有する型を前記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。次に、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、酸化ケイ素複合材料塗布液を約0.2 μ m回転塗布してホットプレートで熱処理し、前記0.8 μ m周期構造を有する型を前記酸化ケイ素複合材料の薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印工程をそれぞれ10回繰り返すことによって3次元均一周期構造を作製した。

【0051】また、不均一部分を含む3次元周期構造についても、前記実施の形態2の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、前記のようにして作製した10周期の3次元均一周期構造上に上述した方法で約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型

を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に、 $0.2\mu\text{m}$ の酸化ケイ素複合材料と $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周期構造を形成した。

【0052】(実施例2)ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料として酸化ケイ素複合材料(屈折率1.4)とを用い、3次元均一周期構造、及び不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成した。次に、前記PZT薄膜上に酸化ケイ素複合材料塗布液を適量滴下して回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ の酸化ケイ素複合材料薄膜を形成した。これを10回繰り返し、10周期分のPZTと酸化ケイ素複合材料との交互積層膜を形成した。その後、前記実施例1で用いたものと同様な $0.8\mu\text{m}$ の均一周期構造を有する型を前記の交互積層膜に押し当てて刻印し、ホットプレートで加熱することで交互積層膜を固化した。これによって3次元の均一周期構造を形成した。

【0053】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施形態3と同様の作製プロセスに従い、以下のように作製した。まず、前記で作製した3次元均一周期構造上に上述した方法で約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた中央部に不均一構造を有する型(図9参照)を押し当てて刻印した後、ホットプレートで加熱処理して固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、前記の均一周期構造を作製した場合と同様に、 $0.2\mu\text{m}$ の酸化ケイ素複合材料と $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の交互積層膜を形成し刻印して均一周期構造を形成した。

【0054】(実施例3)前記実施形態2にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、及び不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0055】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下して回転塗布することで $0.2\mu\text{m}$ の薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、前記実施例1で用いたものと同様な $0.8\mu\text{m}$ の均一周期構造を有する型を上記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約 $0.2\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、上記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約 $0.2\mu\text{m}$ 回転塗布し、ホットプレートで熱

処理し、前記の $0.8\mu\text{m}$ 周期構造を有する型を前記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約 $0.2\mu\text{m}$ の窪みを持つ2次元周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印工程をそれぞれ10回繰り返すことにより、3次元均一周期構造を作製した。

【0056】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施形態2、3の作製プロセスに従い、以下のように作製した。まず、前記のようにして作製した10周期の3次元均一周期構造上に上述した方法で約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた $0.8\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に、 $0.2\mu\text{m}$ のポリイミドと $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周期構造を形成した。

【0057】(実施例4)前記実施形態3にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0058】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成した。つぎに、前記PZT薄膜上に、ポリイミド塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約 $0.2\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜を形成した。これを10回繰り返し、10周期分のPZTとポリイミドとの交互積層膜を形成した。その後、前記実施例1で用いたものと同様な $0.8\mu\text{m}$ の均一周期構造を有する型を前記の交互積層膜に押し当てて刻印し、ホットプレートで加熱し、交互積層膜を固化した。これにより3次元の均一周期構造を形成した。

【0059】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施形態2、3の作製プロセスに従って、以下のように作製した。まず、前記で作製した3次元均一周期構造上に前記した方法で約 $0.2\mu\text{m}$ のPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた $0.8\mu\text{m}$ 周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に、 $0.2\mu\text{m}$ のポリイミドと $0.2\mu\text{m}$ のPZTとの10周期分の均一周期構造を形成した。

【0060】(実施例5)本実施例5は、第1の屈折率を有する材料としてチタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、前記

実施の形態4にもとづいて3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0061】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2 μ mの薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、前記実施例1に用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約0.2 μ m回転塗布しホットプレートで熱処理し、前記の0.8 μ m周期構造の周辺部に支柱用パターンを有する型を前記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印工程をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0062】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施の形態2、3の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、前記のように作製した0.2 μ mのPZTと0.2 μ mのポリイミドとの10周期の均一周期構造上に上述した方法で約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にして、0.2 μ mのポリイミドと0.2 μ mのPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0063】(実施例6) 前記実施形態5にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0064】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2 μ mの薄膜を形成した。次に、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、前記実施例1で用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。次に、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、ポリイミド塗布液を約

0.2 μ m回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、前記の0.8 μ m周期構造を有する型を前記のポリイミド薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 μ mの窪みを持つ2次元周期構造を形成した。その後、フォトリソを用いて紫外線を照射して現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印、紫外線照射工程をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことにより、ポリイミド層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0065】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施の形態2、3の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、前記のように作製した0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にして、0.2 μ mのポリイミドと0.2 μ mのPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0066】(実施例7) 前記実施形態6にもとづく作製方法による3次元フォトニック結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタンを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてポリイミド(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0067】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 μ mのPZT薄膜を形成した。次に、前記PZT薄膜上に、ポリイミド塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 μ mのポリイミド薄膜を形成した。これを10回繰り返して、10周期分のPZTとポリイミドとの交互積層膜を形成した。次に、実施例1で用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記の交互積層膜に押し当てて刻印した。ただし、最上層のポリイミド膜については0.2 μ mではドライエッチング耐性が不十分であったため、刻印・固化後、再度塗布し5 μ mと厚くした。つぎに、前記交互積層膜にフォトリソを用いて紫外線を照射し現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱固化した。その後、パターン形成した後、エッチング部にPZT液を埋め込み加熱し固化した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによってポリイミド層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0068】また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施形態2、3の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、前記で作製した

3次元均一周期構造上に上述の方法で約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にし

て、0.2 μ mのポリイミドと0.2 μ mのPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフオトリジスト層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0072】(実施例9) 前記実施形態5にもとづく作製方法による3次元フオトリジスト結晶の作製を行った。

ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタノを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてフオトリジスト(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。ま

ず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2 μ mの薄膜を形成した。次に、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、実施例1で用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 μ mの窪み

を持つ2次元の周期構造を形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を

固化した。次に、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、フオトリジスト塗布液を約0.2 μ m回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、前記の0.8 μ m周期構造を有する型を前記のフオトリジスト薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を形成した。その後、フオトマスクを用いて紫外線を

照射し、現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印、紫外線照射工程をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフオトリジスト層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0073】また、不均一部分を含む3次元周期構造中に、以下のように作製した。まず、前記のようにして作製した0.2 μ mのPZTと0.2 μ mのフオトリジストとの10周期の均一周期構造上に上述した方法で約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様に

して、0.2 μ mのポリイミドと0.2 μ mのPZTとの10周期分の均一周期構造を積層した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフオトリジスト層を除去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0074】(実施例10) 前記実施形態6にもとづく作製方法による3次元フオトリジスト結晶の作製を行った。ここでは、第1の屈折率を有する材料として、タ

3次元均一周期構造上に上述の方法で約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。次に、前記のPZTの不均一構造上に、前記の均一周期構造を作製した場合と同様にして、0.2 μ m

のポリイミドと0.2 μ mのPZTとの10.5周期分の均一周期構造を形成した。ただし、最上層の(ポリイミドが最上となるように)の交互積層膜を形成し刻印して均一周期構造を形成した。

次に、前記交互積層膜にフオトマスクを用いて紫外線を照射し、現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。その後、パターン形成され

たポリイミド薄膜をマスクとして、フオトリジストで交互積層構造をエッチングした後、エッチング部にPZT液を埋め込み加熱し固化した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除

去し、PZTの3次元周期構造を形成した。

【0069】(実施例8) 前記実施形態4にもとづく作製方法による3次元フオトリジスト結晶の作製を行った。

ここでは、第1の屈折率を有する材料として、チタノを含む酸化物複合材料であるPZT(屈折率約2.6)と、第2の屈折率を有する材料としてフオトリジスト(屈折率約1.5)とを用い、3次元均一周期構造、及

び不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。

【0070】まず、シリコン基板上にPZT溶液を適量滴下し回転塗布して0.2 μ mの薄膜を形成した。つぎに、この塗布膜をホットプレートで熱処理した後、前記実施例1で用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記PZT薄膜に押し当てて刻印し、深さ約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を作製し

た。その後、ホットプレートで加熱し、前記2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。つぎに、前記2次元のPZT周期構造を有する薄膜上に、フオトリジスト塗布液を約0.2 μ m回転塗布し、ホットプレートで熱処理し、前記の0.8 μ m周期構造の周辺部に支柱用パターンを有する型を前記のフオトリジスト薄膜に押し当てて刻印し、約0.2 μ mの窪みを持つ2次元の周期構造を

形成した。その後、ホットプレートで加熱し、前記の2次元の周期構造を有する薄膜を固化した。前記の薄膜形成、刻印をそれぞれ10回繰り返した後、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりフオトリジスト層を除去し、PZTの3次元均一周期構造を形成した。

【0071】また、不均一部分を含む3次元周期構造中に、以下のように作製した。まず、前記のようにして作製した0.2 μ mのPZTと0.2 μ mのフオトリジストとの10周期の均一周期構造上に、上述した方法で、約0.2 μ mのPZT薄膜を形成し、実施例1で用いた0.8 μ m周期構造の中央部に図9で示したような不均一構

タルを含む酸化物複合材料であるタンタル酸ビスマストロンチウム（以下、SBTと呼ぶ）（屈折率約2.2）と、第2の屈折率を有する材料としてフォトレジスト（屈折率約1.5）とを用い、3次元均一周期構造、および不均一部分を含む3次元周期構造を作製した。まず、シリコン基板上にSBT溶液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 μ mのSBT薄膜を形成した。前記SBT薄膜上に、フォトレジスト塗布液を適量滴下し回転塗布後、ホットプレートで熱処理して約0.2 μ mのフォトレジスト薄膜を形成した。これを10回繰り返して、10周期分のPZTとフォトレジストとの交互積層膜を形成した。

【0075】次に、前記実施例1で用いたものと同様な0.8 μ mの均一周期構造を有する型を前記の交互積層膜に押し当てて刻印した。次に、前記交互積層膜にフォトリソマスクを用いて紫外線を照射し、現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。ただし、最上層のフォトレジスト膜についてはドライエッチング耐性を持たせるため、刻印、固化後、再度塗布し厚くした。その後、パターン形成されたフォトレジスト薄膜をマスクとして、ドライエッチングで交互積層構造をエッチングした後、エッチング部にSBT液を埋め込み加熱し固化した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことにより、フォトレジスト膜を除去し、SBTの3次元周期構造を形成した。また、不均一部分を含む3次元周期構造中についても、前記実施例2、3の作製プロセスに従い、以下のようにして作製した。まず、前記で作製した3次元周期構造上に上述した方法で約0.2 μ mのSBT薄膜を形成し、前記実施例1で用いた周期構造の中央部に図9で示したような不均一構造を有する型を押し当てて刻印した後、ホットプレートで熱処理し固化した。つぎに、前記のPZT不均一構造上に、上述の均一周期構造を作製した場合と同様にして、0.2 μ mのフォトレジストと0.2 μ mのSBTとの10.5周期分（フォトレジストが最上となるように）の交互積層膜を形成し刻印して、均一周期構造を形成した。ただし、最上層のフォトレジスト膜はドライエッチングに耐えられるように厚くした。次に、前記交互積層膜にフォトリソマスクを用いて紫外線を照射し、現像してパターン露光部を除去した後、ホットプレートで加熱し固化した。その後、パターン形成されたポリイミド薄膜をマスクとして、ドライエッチングで交互積層構造をエッチングした後、エッチング部にSBTを埋め込み加熱し固定した。最後に、基板を有機高分子用エッチング液に浸すことによりポリイミド層を除去し、SBTの3次元周期構造を形成した。

【0076】また、本実施例では第1の屈折率を有する材料として高屈折率のもの、また第2の屈折率を有する材料として低屈折率のものとし、第1の屈折率を有する材料を第1層目として交互積層したが、状況に応じて第

2の屈折率を有する材料を第1層目とすることができ、また、必要に応じて基板と第1層目との間に有機膜等の柔らかい膜を導入し、刻印を容易にすることも本発明に含まれる。また、刻印前後の熱処理条件も本実施例のみに限られるものではなく、刻印容易性、膜質向上等の点から適宜変更・追加することができる。また、本実施例では、熱処理をホットプレートで行ったが、半導体プロセスで使用されているような赤外線ランプ方式加熱炉や紫外線照射機構付きホットプレートの利用も可能である。前者の場合は高速処理、後者の場合は低温処理が可能となる。さらに、本実施例では、刻印前後の熱処理および刻印工程を室内雰囲気下で、また刻印工程を室温で行ったが、フォトリソ結晶の品質向上の点から、前者については窒素あるいは酸素などの雰囲気下で、また後者については加熱しながら行うことも可能である。

【0077】以上、本発明を実施形態及び実施例に基づき具体的に説明したが、本発明は、前記実施形態及び実施例に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々変更し得ることはいうまでもない。

【0078】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、以下の効果を得ることができる。

(1) デバイス作製に必要な結晶中への不均一部分の導入を容易に行うことができるので、超微小光回路や超低しきい値レーザー等の高性能な光デバイスを実現することができる。

(2) 高品質の3次元フォトリソ結晶を作製することができる。

(3) 従来のものに比べて3次元フォトリソ結晶の作製工程を簡略化することができるので、作製時間を短縮することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による実施形態1の3次元フォトリソ結晶の作製装置の概略構成を示す図である。

【図2】本実施形態1の薄膜の形成された基板と微細構造を有する型との位置合せ機構の概略構成を示す図である。

【図3】本実施形態1の3次元フォトリソ結晶の作製装置における、各工程の流れの一例を示す図である。

【図4】本実施形態1の3次元フォトリソ結晶の作製装置における、各工程の流れの別の例を示す図である。

【図5】本実施形態1の3次元フォトリソ結晶の作製装置を使用して形成された3次元フォトリソ結晶の一例を示す斜視図である。

【図6】本発明の3次元フォトリソ結晶作製装置による実施形態2の3次元フォトリソ結晶の作製方法を説明するための図である。

【図7】本発明による3次元フォトリソ結晶の作製方法で使用する型の斜視図である。

【図8】図7に示す型を用いて形成された3次元周期構

造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図9】本発明による3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図10】図9に示す型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図11】本発明による3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図12】図11に示す型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図13】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態3の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図である。

【図14】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態4の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図である。

【図15】本発明による3次元フォトニック結晶の作製方法で使用される型の斜視図である。

【図16】図15に示す型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図17】十字型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図18】L字型を用いて形成された3次元周期構造を有する3次元フォトニック結晶の一例を示す斜視図である。

【図19】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態5の3次元フォトニック結晶の作製方法を

説明するための図である。

【図20】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態6の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図である。

【図21】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態7の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図である。

【図22】図21に示す方法で適用される型の斜視図である。

【図23】図22に示す型を用いて形成された3次元周期構造を示す斜視図である。

【図24】本発明の3次元フォトニック結晶作製装置による実施形態8の3次元フォトニック結晶の作製方法を説明するための図である。

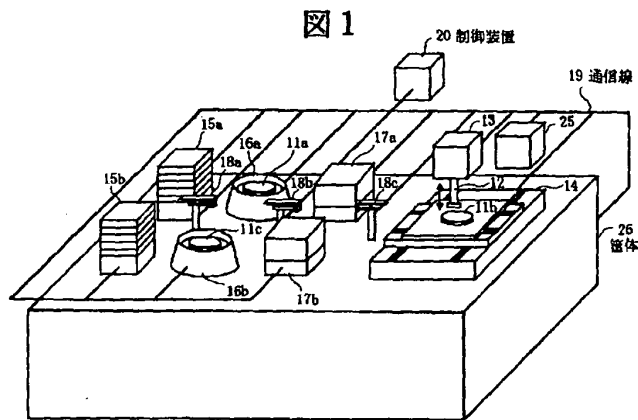
【図25】図24に示す方法で適用される型の斜視図である。

【図26】図25に示す型を用いて形成された3次元周期構造を示す斜視図である。

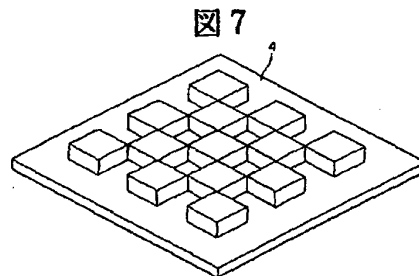
【符号の説明】

1…基板、2…第1の屈折率を有する材料からなる薄膜、3…第2の屈折率を有する材料からなる薄膜、4、5、6…型、7…フォトマスク、8…紫外線、9…フォトレジスト、11a、11b、11c…基板、12…微細構造を有する型、13…刻印機構部、14…刻印用基板ステージ、15a、15b、15c…基板保管部、16a、16b…回転塗布機構部、17a、17b…熱処理機構部、18a、18b、18c…搬送用ロボット、19…通信線、20…制御装置、21a…第1レーザー光、21b…第2レーザー光、22a、22b…ミラー、23a、23b…光検出部、24a、24b…位置合わせ用微細構造マーク、25…型保管庫、26…筐体。

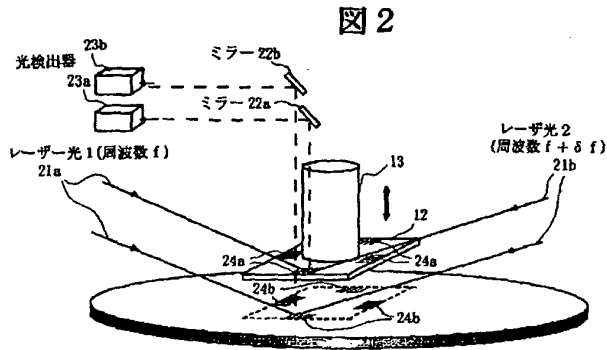
【図1】



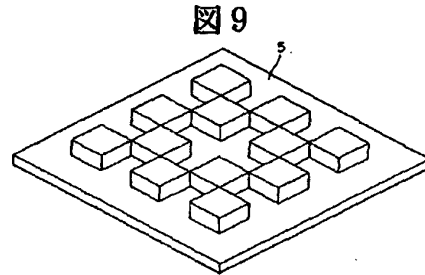
【図7】



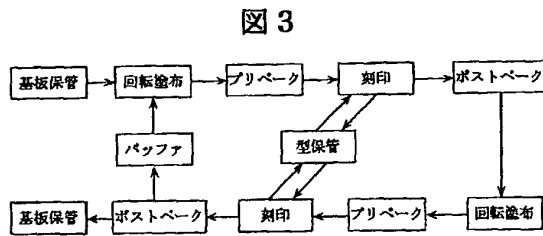
【図2】



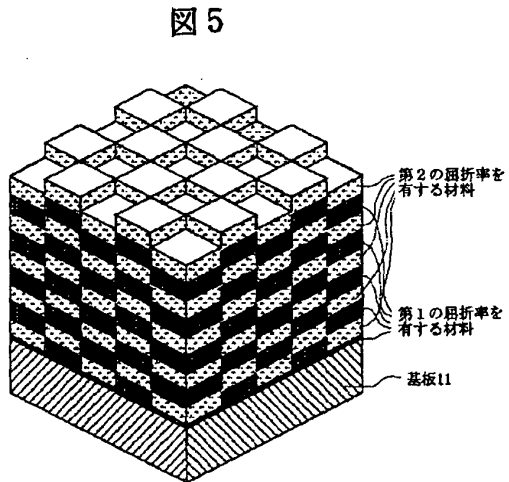
【図9】



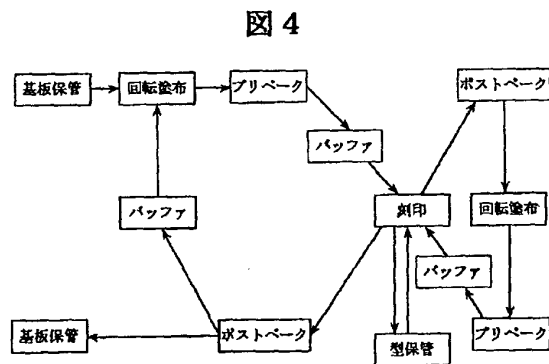
【図3】



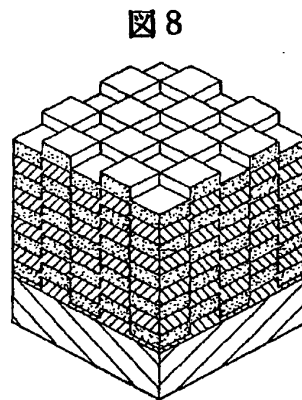
【図5】



【図4】

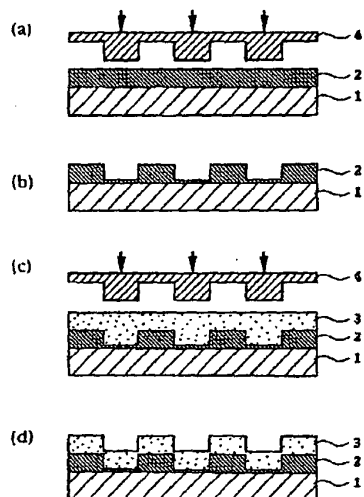


【図8】



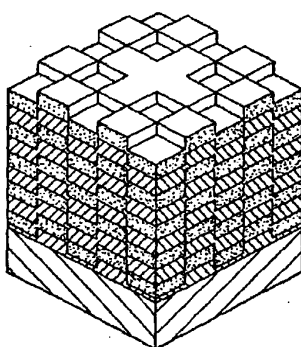
【图6】

图 6



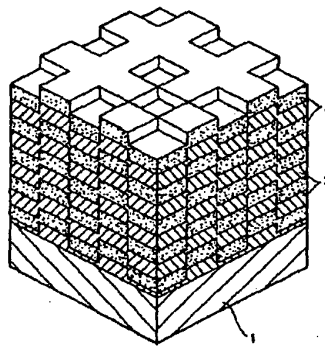
【图10】

图 10



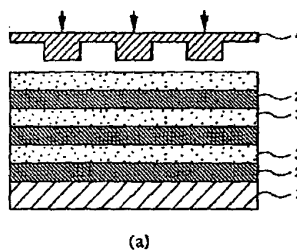
【图12】

图 12



【图13】

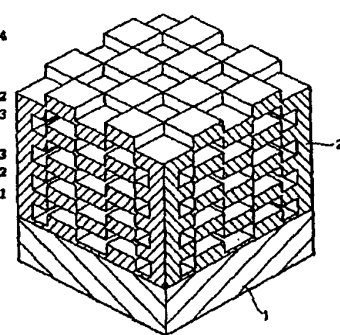
图 13



(a)

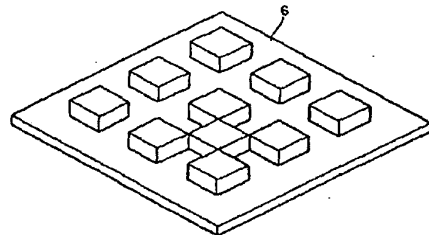
【图16】

图 16



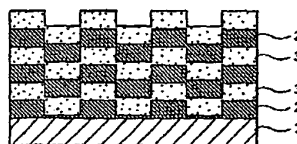
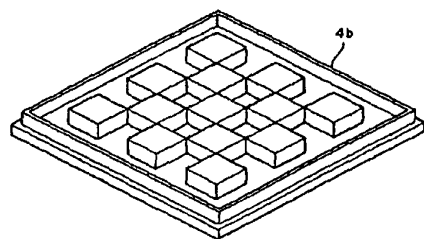
【图11】

图 11



【图15】

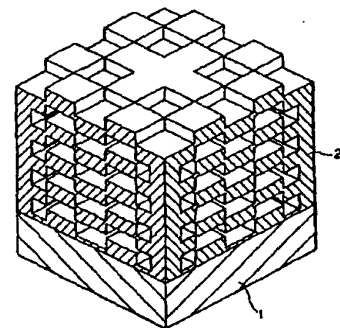
图 15



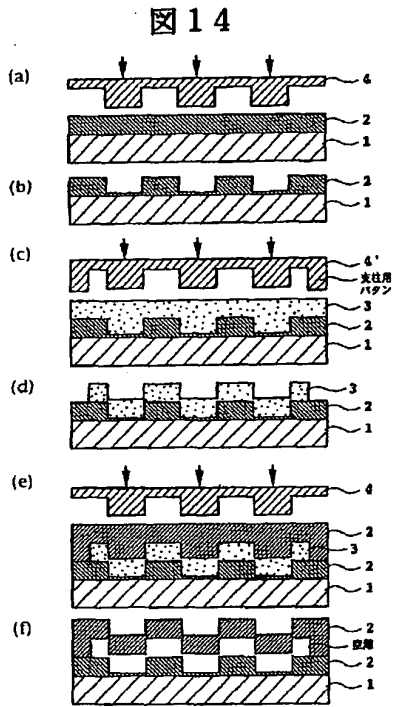
(b)

【图17】

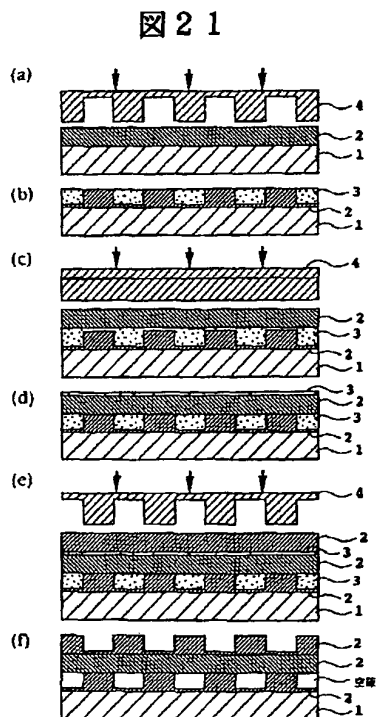
图 17



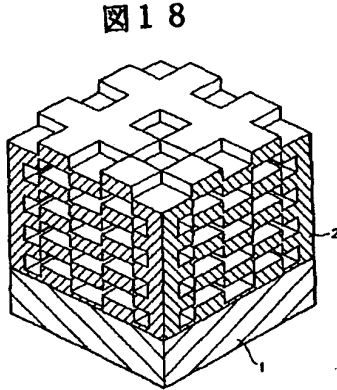
【図14】



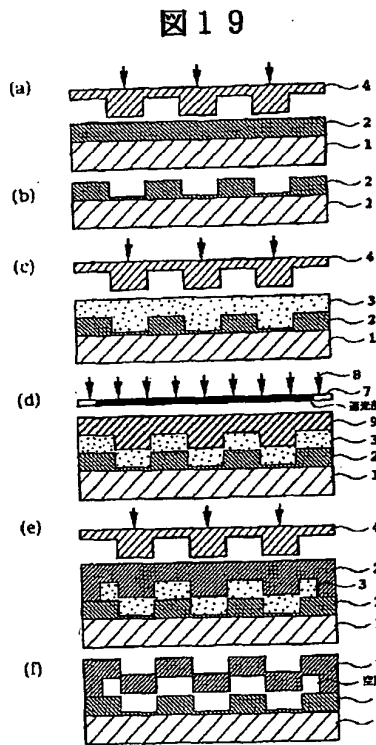
【図21】



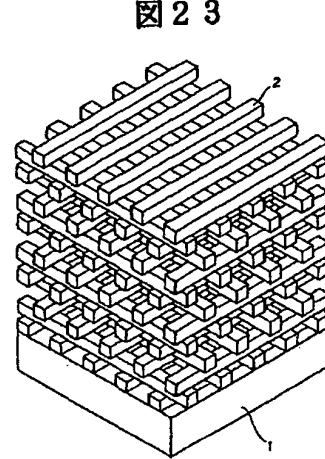
【図18】



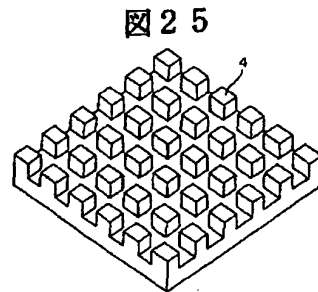
【図19】



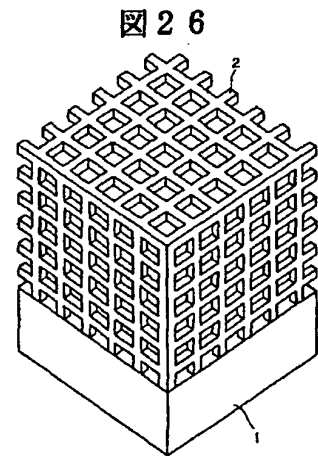
【図23】



【図25】

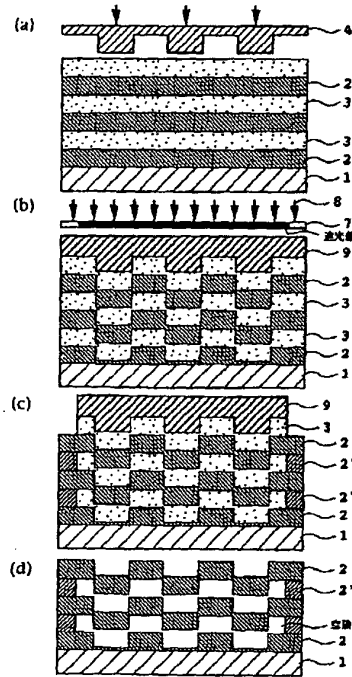


【図26】



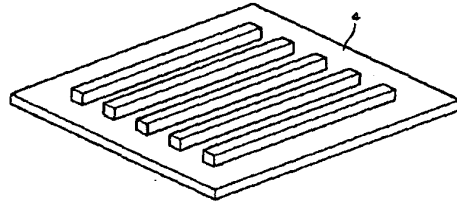
【図20】

図 20



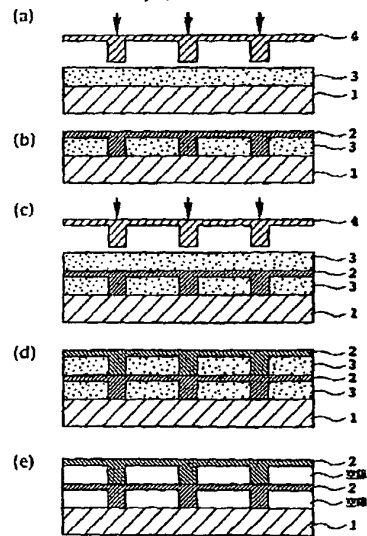
【図22】

図 22



【図24】

図 24



フロントページの続き

(72)発明者 納富 雅也

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72)発明者 玉村 敏昭

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72)発明者 野澤 博

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

Fターム(参考) 2H047 KA03 KB08 PA02 PA04 PA05

PA06 PA12 PA24 QA01 RA08